

Pollution durable des sols par la chlordécone aux Antilles : comment la gérer ?

Cabidoche Y.M.¹, Lesueur Jannoyer M.^{2,3}

¹ Unité ASTRO, INRA, Antilles Guyane,

² Unité HORTSYS, CIRAD, TA B-103/PS4, Boulevard de la Lironde 34398 Montpellier Cedex 5

³ Pôle de Recherche Agroenvironnementale de la Martinique, Petit Morne, 97285 Le Lamentin Cedex 5, Martinique

cabidoch@antilles.inra.fr; jannoyer@cirad.fr

avec la collaboration de :

Claridge Clermont-Dauphin, Guillaume Humbert, Antoine Lafont, Julie Sansoulet (INRA Antilles-Guyane UR ASTRO), François Laurent (INRA Toulouse UMR Xénobiotiques), Maurice Mahieu, Harry Archimède (INRA Antilles-Guyane UR Zootechniques), Philippe Cattan (Cirad Guadeloupe UR BPA), Raphael Achard, Audrey Caron, Christian Chabrier (Cirad Martinique PRAM)

Résumé

La chlordécone, insecticide organochloré de synthèse, était utilisée dans les bananeraies antillaises avant 1993. Pourtant, elle contamine encore les ressources en eau, certaines denrées, et des organismes aquatiques. Très tôt, la recherche agronomique s'est mobilisée pour répondre aux questions posées pour la gestion de cette crise : Où sont les sols pollués ? Est-ce une pollution durable ?

La molécule est peu mobile. Des cartes de risques, fondées sur leur occupation rétrospective en bananeraies, aboutissent à 1/5^e de la SAU polluée en Guadeloupe, 2/5^e en Martinique. Les sols riches en matière organique retiennent fortement la chlordécone. Elle ne se dégrade pas dans les sols aérés, seules les eaux de percolation peuvent la dissiper. Sa persistance est donc longue, d'un à quelques siècles selon les sols. La dépollution artificielle n'est pas actuellement opérationnelle.

Il faut donc gérer cette pollution. Pour réduire l'exposition de la population et la contamination des denrées, les agriculteurs doivent disposer de systèmes de culture et d'élevage compatibles avec les niveaux de chlordécone des sols, restés fertiles. Un outil est disponible, il prend en compte le niveau de pollution de la parcelle et la contamination des cultures : certaines sont très contaminées (tubercules), d'autres indemnes (fruits d'arbres, banane, ananas, tomate, ...).

Mots-clés : organochlorés, pollution chronique, risque d'exposition, transfert, outil de gestion

Abstract: Long term pollution of soils in French West Indies : how to manage chlordecone contamination?

Chlordecone, an organochlorine insecticide, has been used in banana fields before 1993. Nowadays, it is still polluting water resources, food and aquatic biota. Agronomic research has been working very early to answer to how to manage this environmental and sanitary crisis: where are the polluted soils? Is the pollution a long term pollution?

The molecule is not mobile. Risk maps, based on the past banana fields, resulted in the diffuse pollution of 1/5th of cultivated area in Guadeloupe and 2/5th in Martinique. Soils with a high content of organic matter are fixing chlordecone molecule. It has not been observed degradation in aerated soil conditions,

thus natural soil leaching is the only way to decrease soil pollution which is highly persistent, from one to several centuries according to soil type. Efficient depollution is not operational at the moment.

Thus, pollution has to be managed. To reduce population exposure and food contamination, producers need sustainable cropping systems because polluted soil stays productive and fertile. A decision tool is now available, it takes in account the soil pollution level of the field and potential crop contamination: some crops are highly contaminated (roots and tubers), others are chlordecone free (fruits, banana, pineapple, tomato).

Keywords: organochlorine, chronic pollution, exposure risk, transfer, management tool

Introduction

Dans les années 60 et 70, l'on considérait que toute entrave à la productivité agricole pouvait être résolue par des interventions techniques, notamment des apports d'intrants chimiques. Tout bioagresseur des cultures, ayant le moindre impact sur les rendements ou la qualité visuelle des produits récoltés devait être éliminé. Dans les bananeraies des Antilles françaises, ce fut le cas du charançon *Cosmopolites sordidus*, dont les larves détruisent le bulbe du bananier. La lutte contre le charançon utilisait à l'époque des apports massifs d'hexachlorocyclohexane (HCH), sous une forme brute dite « technique », jusqu'à 350 kg/ha/an (Figure 1). Certains producteurs ont alors pris connaissance d'un produit insecticide fabriqué aux USA appelé Képone, contenant 5% de matière active chlordécone, dont la réputation d'efficacité les a conduits à effectuer des tests sur les bananeraies antillaises : avec des apports 100 fois moindres, on obtenait le même résultat qu'avec le HCH. Cette chlordécone est moins soluble et plus fortement fixée à la matière organique des sols que les isomères du HCH (Figure 1). La perspective d'interdiction du HCH au milieu des années 70, et l'apparence très « raisonnable » du rapport quantité/efficacité a entraîné la succession d'autorisations provisoires d'application du Képone, même si des alertes avaient eu lieu (fermeture de l'usine de fabrication de la molécule à Hopewell (Virginie, USA) et interdiction d'usage aux USA en 1976 ; résultats de Snegaroff (1977) sur la contamination des ressources en eau et de certains organismes aquatiques aux Antilles).

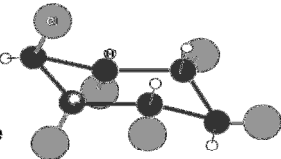
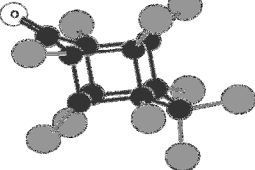
Hexachlorocyclohexane				Chlordecone
				
$\gamma\text{HCH} = \text{lindane}$				
Molécule	$\text{C}_6\text{H}_6\text{Cl}_6$			$\text{C}_{10}\text{Cl}_{10}\text{O}$
Période	1965 - 1974			1972 - 1993
kg/ha/an	> 300			3
Isomère %	αHCH 60-70	βHCH 5-12	γHCH 10-15	CLD 100
Solubilité mg L^{-1}	10	5	7.3	0.35-1
K_{oc} $\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$	<3.7	<3.7	0.9-1.8	17.5
Biodégradation	+	0	+	0

Figure 1 : Configurations moléculaires, utilisation, et principales propriétés de l'hexachlorocyclohexane (HCH) et de la chlordécone

Ce produit ne sera interdit qu'en 1990, avec des dérogations aux Antilles aboutissant à son usage de fait jusqu'en 1993. Les consignes d'application (en général 30 g/pied/an soit 3 kg de chlordécone/ha/an) sont formellement transmises par l'encadrement technique des groupements de producteurs, qui sont eux-mêmes pourvoyeurs de la plupart des exploitants ; par ailleurs le produit est cher, ce qui entrave les surdosages et la constitution de stocks dans les exploitations.

Pendant une vingtaine d'années, de 1973 à 1993, on peut donc considérer que les quantités cumulées de chlordécone apportées représentent en cumulé 60 kg/ha (ou 6 g/m²), soit 50 fois moins que les 3 tonnes/ha de HCH (300 g/m²) apportées précédemment. Ce n'est qu'en 1999 qu'une analyse multi-résidus des eaux potables distribuées met en évidence des concentrations en chlordécone dépassant les normes sanitaires européennes dans certaines sources captées. Une filtration par charbons actifs ou une dilution avec des eaux indemnes sont alors mises en place sur les captages de sources contaminées. Fin 2001, un contrôle douanier montre une contamination de patates douces importées de Martinique dans l'hexagone. Des plans de contrôle sont alors mis en place par les services de l'Etat en Guadeloupe et Martinique, ciblés sur les organes souterrains récoltés (appelés localement « légumes racines ») qui sont parfois très fortement contaminés, au-delà de 1 mg/kg. Dès 2003, les agriculteurs candidats à des cultures vivrières doivent produire un résultat d'analyse de sol (prise en charge par l'Etat), sachant qu'ils s'exposent à des contrôles renforcés et à des destructions de récolte si les organes récoltés sont contaminés. En 2005, la mise en évidence de la contamination de poissons et crustacés d'eau douce conduit à des arrêtés d'interdiction de pêche dans les rivières des communes comportant sur leur territoire des parcelles en bananeraies à l'époque chlordécone. En 2008, la détection de chlordécone dans des organes récoltés autres que souterrains renvoie la responsabilité des agriculteurs au « paquet hygiène » : ils doivent se donner les moyens de garantir une production saine (même si des subventions européennes les aident à identifier le degré de pollution des sols de leurs exploitations). En 2010, des animaux d'élevage sont détectés contaminés par les services vétérinaires après leur abattage. La séquestre à l'abattoir, libératoire si les analyses sont négatives, permet de protéger le consommateur, mais les éleveurs sont demandeurs de conseils de gestion pour éviter de produire des animaux contaminés.

L'AFSSA a travaillé intensément de 2003 à 2008, pour définir des limites maximales de résidus admissibles pour la population humaine, compte tenu des valeurs toxicologiques de référence et des coefficients de sécurité classiquement édictés par l'OMS : cette LMR a été fixée à 50 µg/kg. Le ministère de la Santé a décidé en 2008 de se rapprocher des normes européennes par défaut en fixant cette limite à 20 µg/kg, surprotégeant ainsi les consommateurs par rapport à la norme OMS.

Dans ce contexte, la recherche agronomique s'est investie pour fournir rapidement des réponses aux questions essentielles posées par tous les acteurs (services de l'Etat, agriculteurs, consommateurs) :

- D'où vient la pollution ?
- Où sont les sols pollués ?
- Combien de temps la pollution va-t-elle durer ?
- Va-t-elle se propager ?
- Comment réduire cette pollution ?
- Que peut-on produire sur ces sols pollués, et comment, en garantissant l'innocuité des produits récoltés ?

D'où vient la pollution ?

La chlordécone n'a été normalement appliquée que sur les bananeraies. Cependant, elle peut être un produit d'évolution du Mirex (Perchlordécone), appliqué à proximité des cultures vivrières pour lutter contre la fourmi-manioc dans les années 90, principalement en Grande-Terre de Guadeloupe, et de manière plus limitée dans le nord-est de la Basse-terre de Guadeloupe (la Martinique n'est pas

concernée par cet insecte). La quantité totale estimée de chlordécone pouvant dériver du Mirex correspond aux quantités nominales de chlordécone épandues sur 2 ha de bananeraies entre 1980 et 1993. On remarque que ces apports peuvent être responsables des quelques analyses légèrement positives enregistrées sur les sols de Grande-terre. En dehors de la Grande-terre, aucune analyse significativement positive n'a été enregistrée à la Guadeloupe, mis à part une légère pollution de sols hydromorphes d'arrière mangrove, contaminés secondairement par des émergences de nappes d'eau en aval de collines polluées.

A la Martinique, quelques dizaines d'hectares de cultures arboricoles, identifiés, ont connu des applications de chlordécone pour lutter contre les charançons des agrumes (*Diaprepes spp*).

Globalement, donc, ce sont bien les sols occupés par des bananeraies entre 1971 et 1993 qui constituent actuellement les réservoirs de pollution.

Où sont les sols pollués ?

Des cartes de risques de pollution des sols, fondées sur l'occupation rétrospective en bananeraies, pendant la période d'application de la chlordécone, ont été établies pour la Guadeloupe et la Martinique (Figure 2). Elles ne représentent pas la situation réelle de pollution de chaque parcelle, mais la probabilité que la parcelle soit polluée à des niveaux plus ou moins élevés.

Pour la Guadeloupe, ce travail a été réalisé par la DAAF-SA avec la collaboration de l'INRA-ASTRO en 2005-2006 (Tillieut et Cabidoche, 2006) à partir de photos et de cartes d'occupation du sol (1969, 1977, 1984, 1996). Quatre zones de risques de pollution des sols ont été définies:

1. Risque très fort : risque de teneur très élevée du fait de la présence de bananeraies pendant plus de 10 ans,
2. Risque fort : risque de teneur élevée du fait de la présence de bananeraies avant 1980 ou seulement sur les îlots défrichés en 1984-87.
3. Risque moyen : risque de teneur faible de la présence de bananeraies entre 1977 et 1982, pas de présence relevée sur les autres périodes (avant 1970, après 1995).
4. Risque faible à nul : pas de présence de bananeraies sur les périodes considérées.

Cette carte a été progressivement validée par les analyses des plans de contrôle de la DAAF-SA, celles de l'application des arrêtés préfectoraux sur les intentions de cultures vivrières et de mesures en bananeraies. Fin 2008, sur plus de 2400 analyses disponibles, les zones 1 et 2 (risque très fort et fort) comportent plus de 90% d'analyses positives. A l'opposé, les zones 3 et 4 (risque faible à nul) montrent moins de 6% d'analyses de sols contaminants. La carte des risques de pollution des sols de la Guadeloupe est donc de bonne qualité, on peut considérer que les zones polluées sont globalement bien définies.

Pour la Martinique, le BRGM (Desprats et al., 2004) a utilisé des images cartographiques ou photographiques (1970, 1980, 1992), a incomplètement exploité les figurés de cultures de la carte IGN au 1/25000e (1984) et a considéré que les applications étaient conformes aux recommandations et avaient été modulées selon les niveaux d'infestation, plus faibles dans les zones sèches. Cette dernière hypothèse, optimiste, n'est pas vérifiée car les traitements étaient, comme à la Guadeloupe, appliqués dès la plantation de manière systématique. Cette analyse multicritère a abouti à 11 classes de risque (en fonction du type de sol, de la pluviométrie et de la durée d'occupation du sol en bananeraie) validées également par des analyses de sol. Si la carte des risques forts à très forts demeure bonne, les zones de risque faible à nul sont nettement sur-estimées : plus de 20% des analyses disponibles fin 2008 y sont positives. L'amélioration de ces cartes à dire d'acteurs n'est pas possible. Lors des

enquêtes conduites par les ARS dans le cadre du suivi des jardins familiaux pollués (JAFA), la majorité des acteurs étaient dans l'incapacité de renseigner correctement sur le passé bananier des parcelles ou les applications de chlordécone.

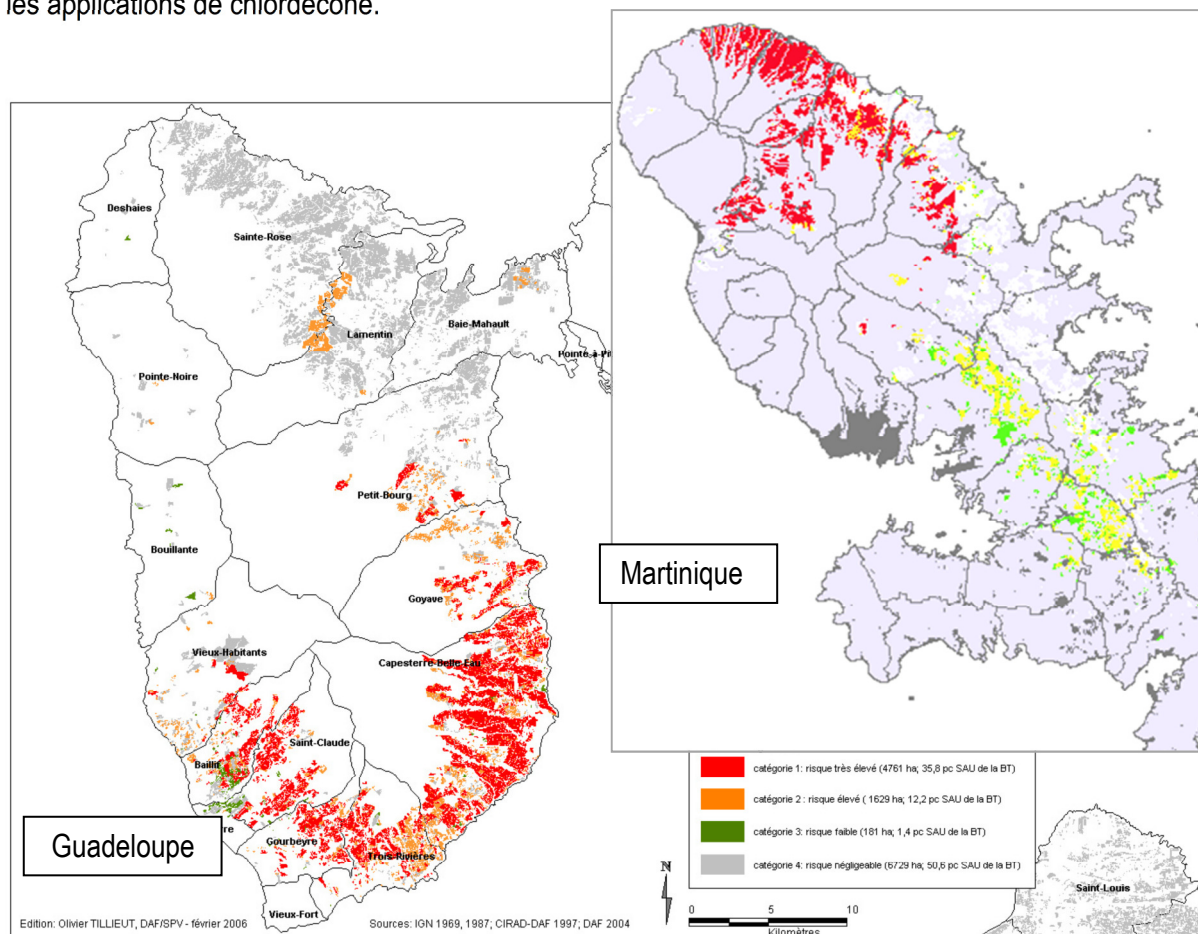


Figure 2 : Cartes des risques de pollution des sols des Antilles par la chlordécone. *Guadeloupe (DAAF-SA Guadeloupe, INRA-ASTRO, 2006) : bonne validation par les analyses réelles recueillies depuis l'élaboration. Martinique (BRGM, 2004) : bonne validation pour les zones à risque très fort (rouge), nombreuses lacunes pour les risques moyens (jaune) et faible (vert), et surfaces sous estimées par la présence d'une zone non inventoriée, en blanc.*

A ce jour, la part de surface agricole utile (SAU) polluée est proche de 1/5e en Guadeloupe (6 200ha sur 34 800ha incluant Marie-Galante). Pour la Martinique, elle est supérieure à 2/5e (12 000ha sur 26 000). Ainsi, tant en Guadeloupe qu'en Martinique, **la majorité de la SAU n'est pas polluée**. Sur ces surfaces indemnes de chlordécone, il convient donc de mettre en œuvre des systèmes de culture ou d'élevage favorisant les régulations physiques et biologiques, maîtrisant les niveaux d'intrants et leur devenir environnemental.

A l'échelle du territoire, ces cartographies du risque sont satisfaisantes, mais à l'échelle de la parcelle, l'analyse du sol est obligatoire pour connaître le niveau de pollution du sol. L'Institut Pasteur Guadeloupe et le Laboratoire Départemental d'Analyses de la Martinique (LDA972) sont aujourd'hui qualifiés (accréditation COFRAC) pour ces analyses.

Combien de temps la pollution va-t-elle durer ? (Cabidoche et al., 2009)

La chlordécone a été épandue sur des sols d'origine volcanique riches en argiles au sens large. Cette richesse en argiles s'accompagne d'une richesse des sols en matière organique. Or, la matière organique des sols, quantifiée par leur teneur en carbone organique, présente une forte affinité pour la chlordécone et la « fixe ». La littérature (RAIS, 2006) mentionne une valeur du coefficient de partage K_{oc} entre le carbone organique du sol et l'eau interstitielle du sol particulièrement élevée (17 500 L/kg), ce qui signifie, qu'à l'équilibre après apport, il y aura 17 000 fois plus de chlordécone « fixée » à un kg de matière organique du sol que contenue dans un litre de solution du sol.

Dans ce contexte où la persistance de la pollution risque s'être longue, la recherche agronomique a pu utiliser efficacement dès 2003 deux dispositifs installés antérieurement pour évaluer l'impact des systèmes de cultures bananiers sur les sols et sur la composition des flux d'eau sortants des sols :

- Une collection de plus de 100 parcelles d'agriculteurs, de niveaux d'intensification variés (travail du sol, fertilisation, pesticides), couvrant la diversité des sols cultivés en bananeraies, conduites par des agriculteurs dont les déclarations de pratiques étaient cohérentes avec les états du milieu observés (Clermont-Dauphin et al, 2006). Près de 60 parcelles ont été sélectionnées en fonction des apports de chlordécone (de 1 application à 1 application tous les ans sur la période).
- Deux parcelles instrumentées en bananeraies, une sur andosol en Guadeloupe, une sur nitisol en Martinique, permettant de recueillir et d'analyser les eaux de ruissellement (circulant en surface des sols) et les eaux de drainage (percolant à travers les sols et alimentant en profondeur les nappes) (Khamssouk, 2001 ; Cattani et al, 2006).

Sur le dispositif de parcelles d'agriculteurs, les teneurs en chlordécone, sur chaque type de sol, sont expliquées à plus de 80% par l'importance des apports passés et par la teneur en carbone, sans même prendre en compte l'ancienneté de ces apports. La dégradation de la molécule est donc très faible et le seul moteur possible de sa dissipation est son lent lessivage par les eaux de drainage. Un modèle de lessivage (WISORCH) a été construit sur des hypothèses simples (cinétique de premier ordre) :

- plus le sol est riche en carbone (matière organique) et plus il retient la chlordécone, en fonction du coefficient de partage K_{oc} ,
- la fraction lessivée par les eaux de drainage est en proportion constante du stock restant adsorbé sur le sol,
- le seul facteur de dilution apparente est le travail du sol : entre maintien de la chlordécone dans les 30 premiers centimètres dans les bananeraies de montagne travaillées manuellement, et dilution mécanique jusqu'à 70 ou 80 centimètres dans des bananeraies au travail du sol lourdement mécanisé (charrues à défoncer).

La confrontation des teneurs mesurées en chlordécone sur les andosols du réseau de parcelles en 2002 ou 2003 et des teneurs calculées par le modèle WISORCH pour un coefficient de partage K_{oc} de 17 500 L/kg a été excellente : seul le lessivage de la chlordécone des sols par les eaux de drainage peut assurer leur lente dépollution.

Pour les autres types de sols (ferralsols, nitisols), les teneurs calculées étaient nettement supérieures aux teneurs mesurées, ce qui a conduit à une révision à la baisse des valeurs de K_{oc} pour ces sols. La confrontation des valeurs de concentrations mesurées dans les eaux de drainage sous les nitisols de la Martinique a permis de confirmer la réalité des coefficients de partage plus bas. Il s'ensuit trois traits de comportements des sols :

- pour des applications passées de la molécule équivalentes, la teneur en chlordécone d'un nitisol est très inférieure à celle d'un andosol, au-delà de l'effet d'une moindre teneur en carbone.

- un nitisol sera plus vite dépollué qu'un andosol.
- pour des teneurs en chlordécone égales, un nitisol est beaucoup plus contaminant pour l'environnement qu'un andosol.

La validité de ce modèle apporte trois informations générales contraignantes :

- la chlordécone ne se dégrade pas spontanément dans les sols agricoles bien aérés,
- les délais de dépollution des sols par lessivage seront extrêmement longs, entre quelques décennies et un siècle pour les nitisols, jusqu'à six siècles pour les andosols avant d'atteindre la limite de quantification de 10 µg/kg. Il en découle également une exposition chronique et durable des écosystèmes aquatiques.

Il faudra donc cohabiter avec la pollution des sols par la chlordécone pour longtemps (Figure 3).

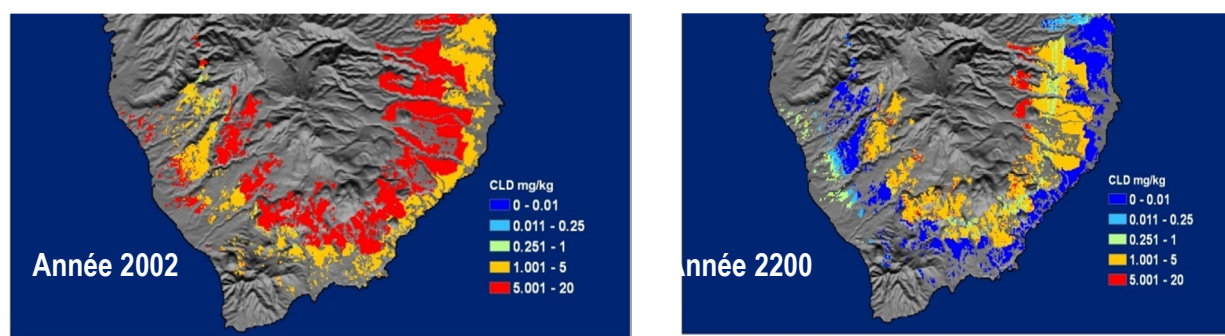


Figure 3 : Simulation de l'évolution des teneurs en chlordécone de la couche de surface des sols de bananeraies du sud de Basse Terre (Guadeloupe).

En supposant l'apport de la totalité des apports préconisés de Curlone (1982-1993), en 2002 les nitisols (en jaune) sont pollués que les andosols (en rouge). En 2200, les nitisols seront dépollués (en bleu), mais les andosols encore loin de l'être (jaune et rouge). (Cabidoche et al., 2006). Copyright INRA (UR ASTRO & US INFOSOL) et IGN

Est-ce que la pollution des sols se propage ?

Propagation latérale

Les mesures effectuées sur les parcelles instrumentées ont montré que le ruissellement - l'eau qui s'écoule en surface des sols - représente en moyenne annuelle moins de 20% de la quantité d'eau qui s'infiltre dans les andosols et nitisols acides. Par ailleurs, ce ruissellement est fugace, et peu efficace dans le transport de chlordécone : les concentrations de chlordécone n'y dépassent pas 2 µg/L là où elles atteignent plus de 8 µg/L dans les eaux de drainage. Des mesures effectuées sur des parcelles n'ayant pas reçu d'apports et situées immédiatement à l'aval de parcelles polluées ne subissent des contaminations que si des chemins d'écoulements concentrés (« talwegs ») relient les deux parcelles. Ces contaminations restent superficielles et très faibles, sur une dizaine de mètres tout au plus. Tant que l'on reste dans le domaine des sols acides et bien structurés (andosol, ferralsol, nitisol), la chlordécone ne « bave » pas et n'affecte que les sols sur lesquels elle a été apportée.

Les contaminations environnementales se font essentiellement via les nappes souterraines, qui alimentent les sources, soutiennent le débit des rivières en période de basses eaux ou résurgent directement à la côte (Charlier, 2007). Dans certaines positions, ces nappes peuvent émerger en piedmont de collines en saturant des sols hydromorphes, notamment d'arrière mangroves : c'est le seul cas de sols apparemment pollués alors qu'ils n'ont jamais reçu d'apport.

Il n'en est pas de même si le ruissellement transporte des particules argileuses en suspension. Ceci peut se produire accidentellement sur les sols acides suite à des erreurs de préparation du sol : un sol laissé nu trop longtemps se fragmente en fins agrégats qui peuvent être transportés par des ruissellements concentrés à débit important, notamment à la sortie de sillons trop longs dans le sens de la pente. Ces transferts se font cependant sur d'assez courtes distances, au plus hectométrique.

Les sols riches en smectites, vertisols au sens large, subissent en revanche une érosion superficielle favorisée par un ruissellement important et une détachabilité des particules argileuses. Ces particules fines restent en suspension dans le ruissellement, et peuvent atteindre les rivières et la mer avant de se redéposer. Ce phénomène affecte presque exclusivement les sols à smectites du centre-est et du sud-est de la Martinique.

Propagation verticale

Compte tenu des K_{oc} élevés, la contamination des horizons profonds des andosols par les eaux de percolation est très lente, et faible à ce jour. Dans les bananeraies pérennes, cultivées sans labour, 90% du stock de chlordécone est présent dans les 30 premiers centimètres.

Dans les bananeraies labourées, une partie de la chlordécone est incorporée à une profondeur supérieure à 30 cm. Dans beaucoup de parcelles labourables, les années chlordécone correspondaient à des passages répétés d'outils travaillant à des profondeurs atteignant couramment 60 cm (charrues à défoncer, charrues à disques lourds, rippers). C'est ainsi que dans beaucoup de parcelles mécanisables, le stock de chlordécone des 30 premiers centimètres ne représente que 50% du stock total du sol. Dans certaines situations (lotissement du périmètre de Fonds-cacao à Capesterre-B-E, Guadeloupe), un labour retourné a été effectué à la charrue à défoncer pour détruire la bananeraie, la totalité du stock se trouve alors en dessous de 30 cm.

Ces pratiques de travail du sol compliquent le diagnostic du niveau de pollution d'un sol, qui ne devrait pas se faire sur une simple teneur des 30 premiers centimètres, mais sur le stock total. Par ailleurs, elles peuvent compliquer la représentativité parcellaire de l'échantillonnage : sur une parcelle n'ayant connu que deux apports de chlordécone, suivis d'un seul labour sur une topographie ondulée, il faut rassembler par moins de 25 échantillons pour obtenir une teneur moyenne fiable à 10% près (Achard et Chabrier, 2004).

Comment réduire cette pollution ? (Clostre et al, 2010)

La solution la plus évidente pour traiter des sols pollués est de décaper la partie la plus affectée. Dans certains cas de sols non labourés (bananeraies pérennes), on pourrait envisager de diminuer de 80% la charge polluante en décapant les sols de 20 cm. Les surfaces concernées seraient faibles, probablement moins de 50 ha, mais supporteraient une baisse de fertilité agronomique importante et un accroissement du risque d'érosion. Dans toutes les autres situations de pollution, la diminution de la charge polluante de 80% supposerait de décaper au minimum 50 à 60 cm de terre correspondant à des volumes de terre impressionnants à traiter (des millions de m³). Elle s'accompagnerait d'une perte totale de fertilité des parcelles après décapage. Une telle solution est à l'évidence irréaliste, le traitement *in situ* des parcelles est privilégié.

Même si la chlordécone est capable de pénétrer dans les végétaux, aucune espèce n'a encore été identifiée comme étant capable d'une capture active, suffisante pour envisager des solutions de phyto-extraction.

La dégradation microbienne semble possible en conditions anaérobies (Cahiers du PRAM 2011), mais elles ne correspondent pas aux conditions physico-chimiques naturelles des sols cultivés. Des équipes de recherche sont mobilisées afin d'explorer les voies de dégradation à privilégier. Des techniques de création de conditions réductrices localisées autour de micro-particules de métaux de valence nulle sont en cours d'étude (Dictor et al, 2011), les résultats sont encourageants mais non encore opérationnels sur le terrain. Par ailleurs, la mobilisation brutale de chlordécone ou de ses métabolites, dont on connaît mal les propriétés, pose question et pourrait avoir un impact environnemental mal évalué aujourd'hui.

Pour toutes ces raisons, la remédiation de cette pollution doit prioritairement passer par des solutions de gestion qui permettent d'en minimiser l'impact et la rendre compatible avec les questions de santé publique, et si possible celles de la santé des écosystèmes d'aval.

Que peut-on produire sur ces sols pollués, et comment, en garantissant l'innocuité des produits récoltés ?

Passée la première phase de diagnostic de la persistance de la molécule et de délimitation de la pollution, c'est sur cette question que s'est focalisée la recherche agronomique régionale depuis 2005. L'ensemble des mesures réalisées sur différentes cultures nous permettent de construire un ensemble d'hypothèses pouvant expliquer la contamination des différents organes végétaux.

Degré d'exposition des plantes selon les sols : la chlordécone biodisponible (Cabidoche et Lesueur-Jannoyer, 2011)

Des tests de contamination d'ignames et de courgettes, menés dès 2005 sur différents types de sols, ont donné des résultats surprenants en apparence, où un nitisol de près de 2 mg/kg se montrait aussi contaminant qu'un andosol à 36 mg/kg (Figure 4a). Par ailleurs, pour chaque sol et chaque plante, la proportionnalité des contaminations de fruits et tubercules avec le niveau de pollution était conservée. Ce n'est ni la teneur, ni le stock total de chlordécone d'un sol qui définissent sa capacité contaminante, mais la fraction de cette chlordécone qui est disponible en solution, dans une unité de volume de sol (1). Cette fraction que nous appellerons chlordécone biodisponible, permet de montrer une relation unique entre sa teneur et la contamination, par exemple, de tubercules d'ignames (Figure 4b).

$$(1) [\text{CLD}]_{\text{bw}} = [\text{CLD}]_{\text{s}} \times W_{\text{fc}} \times D_{\text{as}} / K_{\text{oc}} / \text{SOC}$$

avec $[\text{CLD}]_{\text{bw}}$: teneur en chlordécone biodisponible dans la solution du sol, mg/L

$[\text{CLD}]_{\text{s}}$: teneur pondérale en CLD, mg/kg Sol Sec ;

W_{fc} : teneur volumique en eau du sol à la capacité au champ, %;

D_{as} : densité apparente du sol ;

K_{oc} : coefficient de partage /eau, L/kg

SOC : teneur en matière organique du sol, %

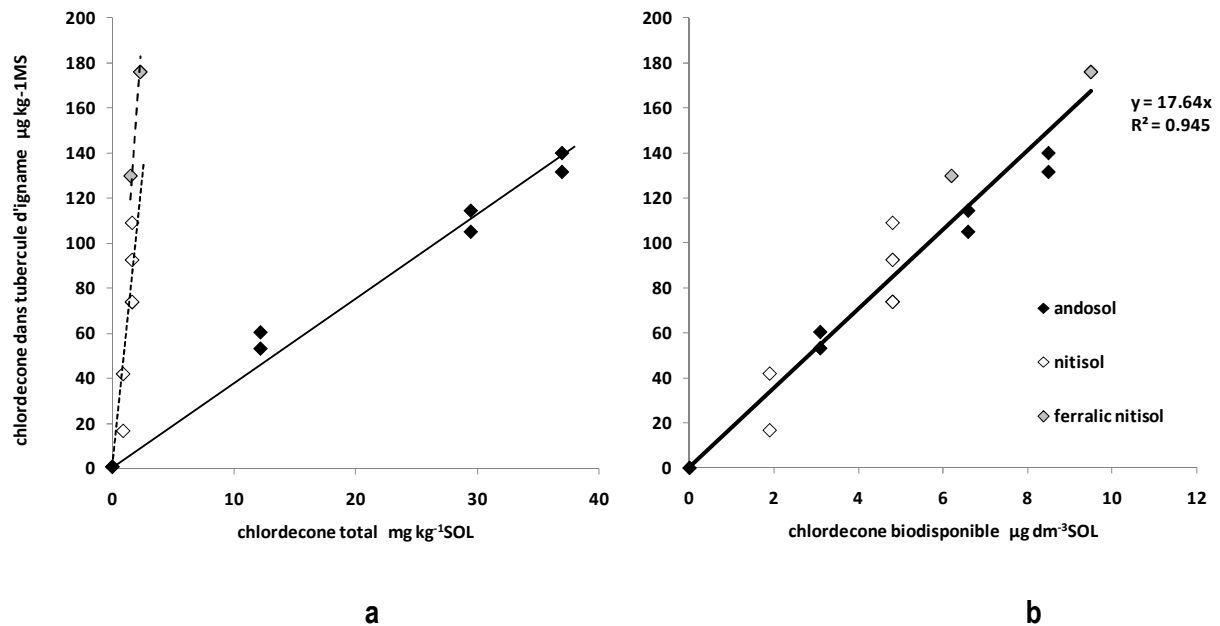


Figure 4 : Relation entre la teneur en chlordécone d'ignames et celle de trois types de sols.

a. teneur pondérale en chlordécone des sols, **b.** teneur en chlordécone biodisponible (en solution dans un volume élémentaire de sol) (Cabidoche et Lesueur-Jannoyer, 2011)

La chlordécone est transférée et contamine les racines de toutes les plantes

Les racines sont contaminées par deux phénomènes : le contact et la diffusion passive.

Au-dessus de leur apex et de la zone d'élongation, les racines se recouvrent d'un épiderme généralement riche en subérine. Cette substance est hydrophobe et présente une forte capacité à fixer la chlordécone. La partie externe des racines est donc très facilement et rapidement contaminée par contact.

Par ailleurs, la chlordécone présente dans la solution du sol pénètre passivement dans les racines par diffusion, entraînée par le flux d'absorption racinaire, sans que des phénomènes actifs ne soient mis en jeu. La quantité de chlordécone qui pénètre dans les racines via la solution du sol est donc la source principale de contamination de la plante entière, la contamination s'effectue via la sève brute (phloème). Elle croise dans les racines, puis dans les différents organes de la plante des sites de fixation potentiels constitués de composés affines (fibres en particulier). Des recherches en physiologie cellulaire, utilisant de la chlordécone marquée au carbone 14, sont en cours pour préciser ces mécanismes de transfert et d'adsorption.

La contamination des différents organes au-dessus des racines dépend de leur affinité pour la molécule et de leur position dans le circuit de la sève

Une fraction de la chlordécone en solution suit le flux de sève, qui s'épure sur son trajet en rencontrant des tissus végétaux à forte affinité. Si ces tissus sont en amont des organes récoltés dans le circuit de la sève, ces derniers sont non ou très faiblement contaminés. Si au contraire ces organes récoltés sont positionnés sur le début du parcours du flux de sève, et comportent des tissus à affinité pour la chlordécone, ils seront contaminés (figure 5). La compréhension de ces phénomènes n'en est qu'à ses débuts, notamment concernant l'affinité des différents tissus pour la chlordécone, mais quatre exemples permettent d'illustrer ces mécanismes.

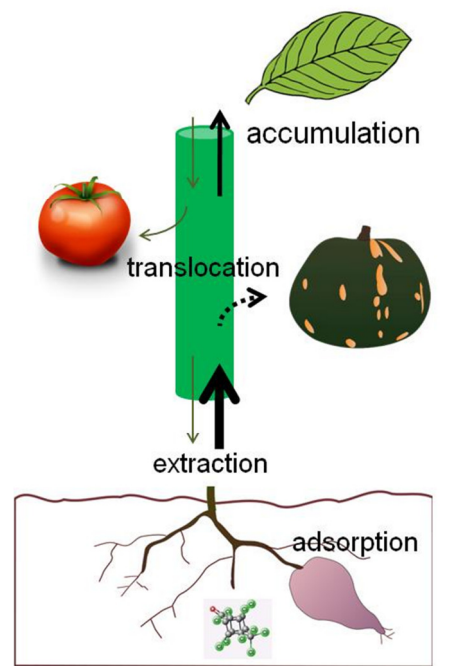


Figure 5 : Voies de contamination par la chlordécone chez les plantes

Contamination des bananiers, des arbres et des graminées

Les racines, mais aussi le bulbe sont fortement contaminés; dans le faux-tronc, la contamination décroît avec la hauteur, affectant plus les gaines foliaires externes que les internes, plus jeunes. Dans les limbes des feuilles, une faible contamination est encore quantifiable, elle ne l'est plus lorsqu'on dose la chlordécone dans les bananes, quelle que soit la position des « mains » sur le régime. Ce transfert de chlordécone dans le bananier met en jeu des « filtres » successifs le long du circuit de la sève, et n'atteint pas ou très peu les fruits (Figure 6 a).

Ce système de filtres sur le flux de sève brute est probablement encore plus efficace dans les arbres fruitiers, aux troncs ligneux : à ce jour, de nombreuses analyses réalisées sur des fruits divers (carambole, citron vert, goyave, jujube, maracuja, papaye, prune de cythère) sont négatives ou proches du seuil de détection (1 µg/kg MF).

Les mêmes gradients décroissants racines - bases de tige - sommets de tige – feuilles sont observables pour la canne à sucre (Figure 6 b), tout comme pour d'autres Poacées dont la tige peut devenir ligneuse, au moins à la base : herbe à éléphant, herbe de Guinée, sorgho...

Si le schéma général reste le même, il est évident que l'on ne doit pas confondre organe récolté et plante entière. Les bananes restent indemnes et la transformation des tiges entières de canne à sucre aboutit à des produits indemnes (rhum et sucre), mais la consommation des bases de faux troncs, et de la bagasse peut comporter des risques d'exposition pour les animaux. Le risque existe également pour les enfants pour la consommation de bases de tiges de canne contaminées.



Figure 6 : Contamination du bananier (a) et des tiges de canne à sucre (b) (Lesueur Jannoyer, 2010). Pour le bananier les données ont été obtenues sur une parcelle d'andosol très polluée (21mg/kg SS) et 20 répétitions ; pour la canne les données ont été obtenues sur 6 parcelles de 3 types de sol très pollués et 20 répétitions par parcelle.

Contamination de la tomate

Aucun fruit de tomate n'a été détecté contaminé, même dans le cadre d'expérimentations contrôlées menées sur les sols les plus pollués connus. Pourtant, les tiges et les feuilles de tomate sont contaminées. Ce fruit bénéficie de conditions de croissance évitant la contamination :

- remplissage nocturne par la sève élaborée issue des feuilles et faiblement contaminée, mise hors circuit de la sève brute (sève la plus contaminée) dans la journée,
- efficacité des « filtres » tige et feuilles en amont,
- aucun tissu à forte affinité dans le fruit (eau, sucres).

Toute ou partie de ces propriétés permettront probablement d'expliquer qu'aucun fruit de Solanée n'a été à ce jour détecté contaminé par la chlordécone (tomate, aubergine, poivron, piment).

Contamination de la courgette

Les détections de contaminations de certaines cucurbitacées ont été dans un premier temps attribuées à un contact avec le sol : c'est vrai pour le concombre, le melon, la pastèque, le giraumon, dans les conditions de culture de plein champ aux Antilles. Un essai a été mené sur la courgette, en conditions contrôlées évitant tout contact avec le sol.

Les courgettes récoltées se sont toutes avérées fortement contaminées, à plus de 10 fois la LMR, quelles que soient leur position sur la plante, leur date de formation ou leur date de récolte. Leur contamination s'explique par deux caractéristiques de la plante : absence de tige « filtrante », remplissage en eau du fruit sur le flux diurne de sève brute, au même niveau que les feuilles, et forte vascularisation des tissus. Le remplissage par la sève brute est intense et direct (réalisé sur un circuit court) : la contamination est ainsi plus élevée.

Si les propriétés de remplissage diurne sont communes aux Cucurbitacées, une étude par espèce (voire par variété) sera nécessaire pour comprendre la susceptibilité et la localisation tissulaire de contamination pour chacune (différenciation pulpe, peau dans certains cas). Pour le giraumon, *Cucurbita maxima*, et le concombre, *Cucumis sativus*, le taux de transfert maximum entre le sol et le fruit est de 2.5 et de 1.2% respectivement alors que la christophine, *Sechium edule*, reste indemne. Pour le giraumon, le taux de transfert dans la peau est 4 fois plus élevé que pour la pulpe (Figure 7)

alors que cette différence est peu marquée pour le concombre (Clostre et al, 2011). Pour d'autres molécules organochlorées, la capacité d'extraction par les racines varie fortement selon les espèces et les variétés (White, 2011).

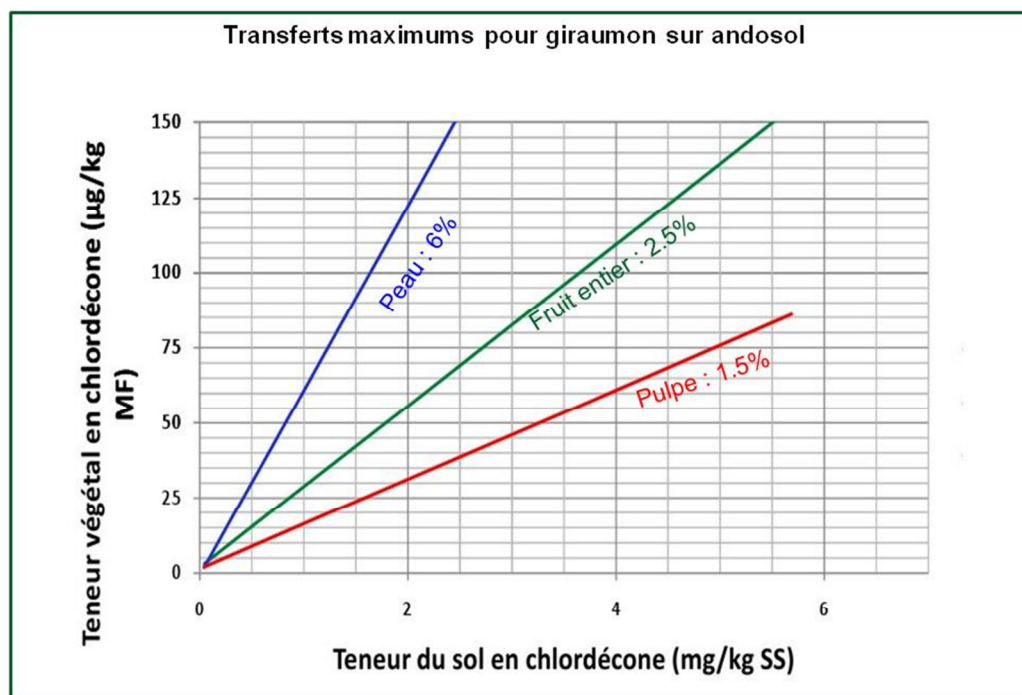


Figure 7 : Taux de transfert maximum entre le sol et les différents compartiments (peau, pulpe) du fruit pour le giraumon (Clostre et al, 2011).

Contamination des ignames

Les racines sont très fortement contaminées, au même niveau que le sol environnant, puis le collet et les enveloppes des jeunes tubercules en formation. Les tiges peuvent être contaminées jusqu'à des hauteurs importantes (plus de 2m), mais à un étage donné de tige, les feuilles le sont 10 fois moins car elles sont plus riches en cellulose à faible affinité pour la chlordécone. Finalement, les sucres produits par les feuilles sont indemnes, migrent via la sève élaborée vers les tubercules qui accumulent de l'amidon, indemne lui aussi : plus le tubercule grossit et moins il est contaminé, la part de la pulpe indemne augmentant par rapport au cortex contaminé. Finalement, la contamination des ignames récoltées concerne essentiellement le cortex, un épluchage gras de ces derniers permet de consommer une pulpe dont la teneur en chlordécone, au moins 10 fois plus faible que celle du tubercule entier, ne dépasse pas la LMR, même sur sol fortement pollué.

Pour les différentes espèces de racines et tubercules (patate douce, dachine/madère, chou caraïbe,...), la contamination de la pulpe peut être variable selon la physiologie de la plante, mais l'épluchage réduit toujours fortement l'exposition du consommateur (facteur 4 à 10).

Lorsque l'on utilise des variétés aériennes d'igname (*Dioscorea bulbifera*), les bulbilles récoltées sont très faiblement contaminées (< 5 µg/kg MF) ce qui confirme également la contribution importante du contact direct entre le sol et le tubercule pour les autres espèces (Clostre et al, 2011) et l'interposition d'organes « filtres ». Cette espèce pourrait constituer une bonne alternative pour la production de féculents indemnes, à la condition de caractéristiques organoleptiques proches de l'igname classique et de son acceptation par les consommateurs.

Que peuvent récolter les agriculteurs sur des sols pollués sans risquer de dépasser la LMR ?

Utilisation d'un référentiel de contamination sol/légumes racines pour l'aide à la décision (Cabidoche et Lesueur-Jannoyer, 2011)

La collection de résultats obtenus sur igname et patate douce cultivées sur ferrallit nitisol (Figure 8) a confirmé quatre faits robustes : (i) plus un sol est pollué, plus les légumes-racines sont contaminés, (ii) les légumes-racines portent le record de contamination relative, (iii) la contamination par contact y joue une part importante, car les cortex sont plus contaminés que les pulpes, et pour les madères les bases plus que les sommets émergés, et (iv) aucune espèce ne se distingue significativement des autres, malgré des tailles et des physiologies très différentes.

La relation de contamination moyenne, illustrée par la régression linéaire, correspond à une teneur en chlordécone égale à 1/40^e de celle du sol encaissant (soit un transfert moyen de 2.5%). Toutefois, certains organes récoltés s'approchent de 1/10^e (madères, radis). Il est raisonnable de considérer que le majorant de cette contamination relative (transfert maximum) est l'enveloppe de la contamination des cortex d'ignames, soit 1/5^e (Figure 8). Cette valeur empirique correspond à un équilibre, relatif à la matière sèche, entre le sol et les tissus du cortex.

On peut ainsi proposer de définir un majorant de contamination des « racines » récoltées par cette relation :

$$[CLD]_{R\&T} < 1/5 [CLD]_s$$

avec $[CLD]_{R\&T}$: teneur en chlordécone dans les racines et tubercules, $\mu\text{g/kg MF}$

$[CLD]_s$: teneur en CLD du sol, $\mu\text{g/kg Sol Sec}$;

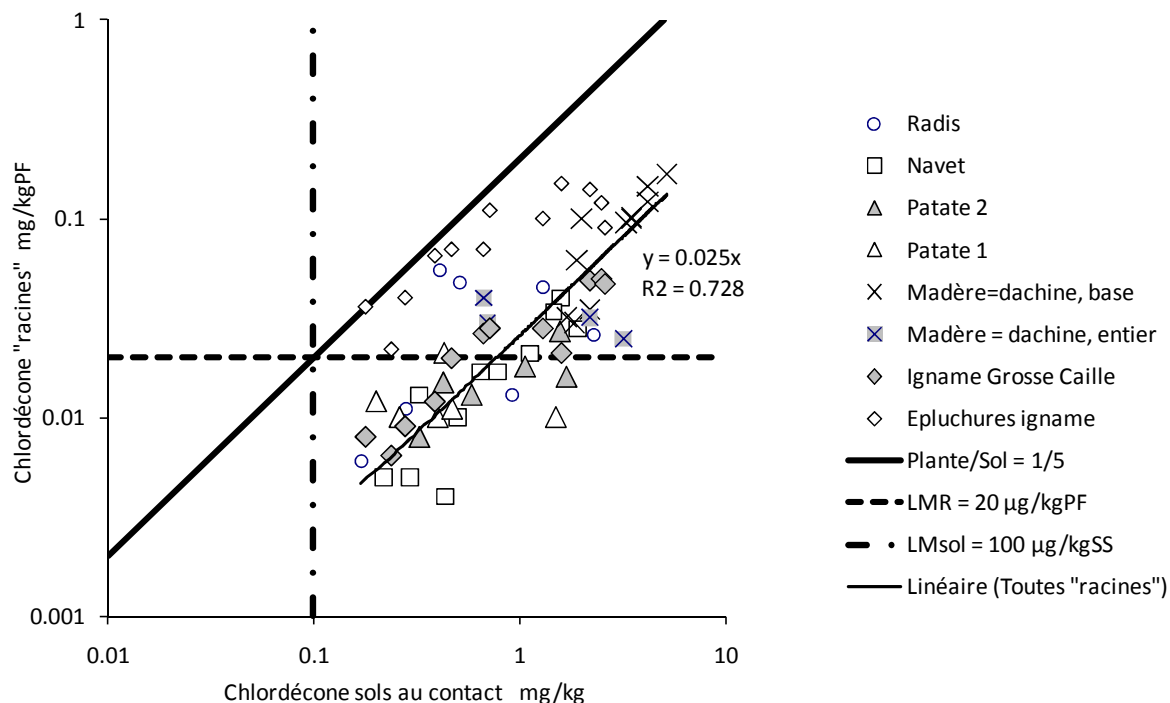


Figure 8 : Relation de contamination des organes souterrains récoltés en fonction de la teneur en chlordécone du sol encaissant (données obtenues sur un ferrallit nitisol à biodisponibilité de la chlordécone élevée) (Cabidoche et Lesueur-Jannoyer, 2011)

Une fois admise cette relation, on peut considérer que la projection verticale de son intersection avec la Limite Maximale de Résidus autorisée dans les denrées (LMR, 20µg/kg MF) permet de définir un seuil de teneur de chlordécone du sol en deçà duquel n'importe quel organe récolté sera à coup sûr conforme (inférieur à la LMR): concrètement, tout sol, quel que soit sa nature, permettra de récolter des organes commercialisés conformes si sa teneur en chlordécone est inférieure à 0.1 mg/gSS.

Extension aux organes récoltés aériens

Pour les organes aériens récoltés qui sont indemnes même sur les sols les plus contaminés (cf modèle tomate et cas des fruits d'arbres, et de la plupart des fruits aériens de plantes herbacées comportant un remplissage par la sève élaborée : agrumes, ananas, banane, carambole, choux, christophine, gombos, maracujas, papaye, prune de cythère, solanées, ...), ils peuvent être cultivés quel que soit le niveau de pollution du sol. Même si aucun modèle mécaniste ne permet encore de simuler la contamination des tissus intermédiaires, on peut affirmer que les tissus « filtres » efficaces existent en amont des produits récoltés.

Certains organes aériens récoltés montrent une susceptibilité de contamination significative : ce groupe rassemble l'essentiel des Alliées (cive - oignon pays, oignon, poireau) en contact avec le sol, mais aussi les Cucurbitacées, dont les fruits sont remplis partiellement le jour et peu distants des racines (concombre, melon, pastèque, giraumon). Il comporte aussi des Poacées, dont la base des tiges peut être contaminée, et les Crucifères utilisées comme salades. En appliquant le même raisonnement que pour les racines et tubercules (traduction de la LMR en fonction du taux de transfert maximum), ce groupe de plantes peut être cultivé sans risque pour des teneurs dans les sols ne dépassant pas 1 mg/kgSS.

Ces normes proposées tiennent compte de références obtenues sur les sols les plus contaminants et sont donc très protectrices pour le consommateur ou contraignantes pour le producteur. Il sera possible de les adapter pour chaque type de sol. Des expérimentations sont en cours pour conforter cette attitude, qui est bien sûr plus délicate à endosser que la norme globale : cela suppose un accès à la connaissance du type de sol de chaque parcelle, qui comporte quelques incertitudes dans les zones de transition entre types.

Contamination des animaux d'élevage

La contamination des animaux est un processus complexe, dans lequel la consommation d'herbe intervient peu si celle-ci est abondante, car les feuilles sont indemnes. En revanche, si l'herbe fait défaut, les animaux sont contraints de consommer les bases de tige, significativement contaminées, mais surtout d'ingérer de la terre contaminée à des niveaux bien supérieurs. Par ailleurs, leur abreuvement est parfois réalisé à partir d'eaux de sources ou de ravines polluées. Le système d'élevage le plus sûr est fondé sur une stabulation permanente et un affouragement en fauche avec des hauteurs de coupes croissantes, alternant avec des fauches de rabattement, et un abreuvement avec de l'eau saine. Une étude est en cours pour faire la part des différentes sources de contamination, et pour proposer des modes de conduite d'élevage propres à minimiser la contamination.

Les mammifères d'élevage (bovins, caprins, ovins, porcins) disposent comme l'homme d'une enzyme, la chlordécone-réductase, capable de la transformer en chlordécol excrétable. Les premiers résultats obtenus (coll. DAAF-SA Martinique) sur des bovins contaminés mis en conditions indemnes de chlordécone montrent une diminution de moitié de la concentration dans le plasma en seulement 45 jours. C'est plus rapide que chez l'homme, et autorise d'envisager des systèmes d'élevage transhumants où la finition des animaux se ferait en zone indemne de chlordécone.

Pour les bovins, ce risque est géré par une coopération exemplaire entre les professionnels et les services vétérinaires (DAAF-SA). Les contrôles à l'abattoir sur la totalité des élevages à risque sont faits sous le régime de séquestre libératoire avec conservation en chambre froide : si les animaux s'avèrent non contaminés, ils sont normalement commercialisés, et dans le cas contraire les carcasses sont détruites.

La contamination des volailles ne concerne exclusivement que les petits élevages familiaux (situation de jardin créole) car aux Antilles les systèmes d'élevage majoritaires sont des systèmes de type hors sol situés dans des zones non polluées. Une première étude montre que les poules ont une grande capacité d'extraction de la molécule du sol, et que le type de sol n'a pas d'effet. Afin de modéliser le flux de chlordécone chez la poule pondeuse, l'analyse de la quantité de sol ingéré et de la dynamique de contamination des différents organes (œuf, graisse, foie) est nécessaire.

Conclusions

Les sols pollués par la chlordécone aux Antilles le sont pour longtemps : la dépollution par lessivage est lente, les procédés de dégradation ne sont pas opérationnels, même s'ils font l'objet d'un gros effort de recherche pluri-organismes.

Il faut donc « faire avec », et continuer d'utiliser ces sols, qui conservent tout leur potentiel de fertilité, pour des systèmes de culture ou d'élevage dont les produits n'affectent pas la santé humaine. Leur attribuer une autre fonction (production énergétique, urbanisation) affecterait gravement le potentiel agricole de Guadeloupe et Martinique, dont les SAU sont par ailleurs en inexorable régression. La recherche agronomique s'efforce de fournir des références opérationnelles et certifiées quant à la sécurité sanitaire des produits récoltés sur les sols pollués. Un outil d'aide au choix des cultures possibles sur sol pollué est disponible pour les professionnels agricoles. De nouvelles orientations durables des systèmes de culture pourront ainsi être favorisées. Concernant l'élevage, l'acquisition des données est en cours et devrait également aboutir à des recommandations ciblées pour des systèmes de production de viande conforme.

La recherche agronomique apporte également une meilleure compréhension des transferts environnementaux de chlordécone, et en collaboration avec les enseignants chercheurs de l'UAG, des impacts éco-toxicologiques de la chlordécone. Un effort de recherche particulier est engagé pour mieux comprendre les expositions des écosystèmes se situant en aval des sols pollués : torrents, rivières, estuaires, mangroves, herbiers, récifs.

Références bibliographiques

- Achard R., Chabrier C., 2004. Cartographie du risque de pollution des sols par les organochlorés. Fiche technique de mode opératoire : prélèvement d'un échantillon de sol, CIRAD, 2p.
- Achard R., Cabidoche Y.-M., Caron A., Nelson R., Duféal D., Lafont A., Lesueur -Jannoyer M., 2008. Contamination des racines et tubercules cultivés sur sol pollué par la chlordécone aux Antilles. Cahiers PRAM, Le Lamentin, Martinique, 7(2007), 45-50. à consulter sur www.pram-martinique.org
- Cabidoche Y.-M., Lehmann S., Martin M., Tillieut O., 2006. Spatialisation du risque de contamination des sols par un pesticide organochloré rémanent autrefois appliqué sur des sols tropicaux volcaniques : la chlordécone aux Antilles françaises. Journée GIS « sol », Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, Paris, 20 novembre 2006.
- Cabidoche Y.-M., Clermont-Dauphin C., Lafont A., Sansoulet J., Cattan P., Achard R., Caron A., Chabrier C., 2006. Stockage dans les sols à charges variables et dissipation dans les eaux de zoocides

- organochlorés autrefois appliqués en bananeraies aux Antilles : relation avec les systèmes de culture. Rapport final de contrat de recherche, AP « Pesticides » 2002 MEDD. APC INRA Antilles-Guyane, 99p.
- Cabidoche Y.-M., Achard R., Cattan P., Clermont-Dauphin C., Massat F., Sansoulet J., 2009. Long-term pollution by chlordane of tropical volcanic soils in the French West Indies: A simple leaching model accounts for current residues. *Environmental Pollution*, 157, 1697-1705.
- Cabidoche Y.-M., Cattan P., Clermont-Dauphin C., Gaspard S., Lesueur-Jannoyer M., Merciris-Loranger G., 2009. Pollution persistante des sols aux Antilles par des insecticides organochlorés : HCH et chlordécone encore pour des siècles ? Rencontres « Sites et Sols Pollués », Paris, 20-21 octobre 2009. Présentation orale, CDROM, ADEME (Résumé étendu)
- Cabidoche Y.-M., Lesueur-Jannoyer M., 2011. Fate of chlordane in agrosystems of the French West Indies. *Accepté par Pedosphere*.
- Cahiers du PRAM, 2011. Remédiation à la pollution par la chlordécone aux Antilles. Les Cahiers du PRAM vol 9-10, avril 2011, 97p. à consulter sur www.pram-martinique.org
- Cattan P., Cabidoche Y.-M., Lacas J.-G., Voltz M., 2006. Occurrence of runoff on high infiltrability andosol under two banana cropping systems. *Soil Tillage Research*, 86, 38-51.
- Charlier J.-B., 2007. Fonctionnement et modélisation hydrologique d'un petit bassin versant cultivé en milieu volcanique tropical. Thèse de Doctorat, Université de Montpellier 2, 246p.
- Clermont-Dauphin C., Cabidoche Y.-M., Meynard J.-M., 2005. Diagnosis on some aspects of the sustainability of low input cropping systems in a tropical upland of Southern Haïti. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 105, 221-234.
- Clostre F., Lesueur Jannoyer M., Cabidoche Y.M., 2010, Conclusions de l'Atelier « Remédiation à la pollution par la chlordécone aux Antilles » 17-19 mai 2010, Martinique – 20-22 mai 2010, Guadeloupe, Cirad, 36p + annexes
- Clostre F., Lesueur Jannoyer M., Turpin B., 2011. Impact des modes de préparation des aliments sur l'exposition des consommateurs à la chlordécone. Rapport final projet Jafa. Cirad, mars 2011, 147p + annexes
- Desprats J.F., Comte J.P., Chabrier C., 2004. Cartographie du risque de pollution des sols de Martinique par les organochlorés. Rapport Phase 3. BRGM RP 53262 FR, Orléans, 23 p, 10 ill., 6 cartes.
- Dictor M.C., Mercier A., Lereau L., Amalric L., Bristeau S., Mouvet C., 2011. Décontamination de sols pollués par la chlordécone. Validation de procédés de dépollution physico-chimique et biologique, étude des produits de dégradation et amélioration de la sensibilité analytique pour la chlordécone dans les sols. Rapport final. BRGM/RP-59481-FR, 201p
- Khamsouk B., 2001. Impact de la culture bananière sur l'environnement. Influence des systèmes de culture bananière sur l'érosion, le bilan hydrique et les pertes en nutriments sur un sol volcanique en Martinique (cas du sol brun rouille à halloysite). Thèse de docteur ingénieur ENSA de Montpellier UFR Science du Sol, juin 2001, 220p
- Tillieut O., Cabidoche Y.-M., 2006. Cartographie de la pollution des sols de Guadeloupe par la chlordécone : Rapport technique. DAAF-SA & INRA-ASTRO, Abymes, 23p.
- Risk Assessment Information System. (2006). "Toxicity and Chemical-Specific Factors Data Base (Kepone)." from http://risk.lsd.ornl.gov/cgi-bin/tox/TOX_9801.
- White J., 2011. Phyto-extraction de polluants organiques persistants altérés. Les Cahiers du PRAM 9-10, 61-63.